

MODELADO MATERIAL DEL TERRENO MEDIANTE TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

José António de Oliveira Simões¹; Gaspar Fernández San Elías²;
Fernando Jorge Fraile Fernández³

Escola Superior de Artes e Design¹; Universidad de León²; Universidad de León³

Porto/Portugal¹; León/España²; León/España³

josesimoes@esad.pt¹; gfers@unileon.es²; fjfrac@unileon.es³

Resumen: El desarrollo de programas informáticos capaces de gestionar y representar gráficamente información georreferenciada es una aplicación más o menos reciente. La evolución de este software, denominado genéricamente como Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el que se combina la representación gráfica del territorio con sistemas de gestión de bases de datos y análisis estadístico, ha sido constante y cada nueva versión supone un salto cualitativo importante en cuanto a potencia y posibilidades de procesamiento. Sin embargo, ninguna de estas aplicaciones considera la posibilidad de generar modelos físicos materiales de un territorio determinado, realizados a escala, a los que se puedan añadir una serie de datos geográficos, o incluso insertar modelos con representaciones de edificaciones realizadas con programas CAD. En la actualidad existe la posibilidad de fabricar objetos obtenidos directamente a partir de un modelo digital almacenado en un fichero informático mediante un proceso denominado Prototipado Rápido.

El objetivo del presente trabajo es describir el proceso de construcción de modelos materiales del terreno, de gran precisión y exactitud, a partir de datos utilizados y transformados en GIS, mediante técnicas de Prototipado Rápido.

Palabras clave: SIG, MDT, Prototipado Rápido, Impresión Tridimensional

Abstract: The development of software to graphically display and manage georeferenced information is rather recent. This software, known generically as Geographic Information Systems (GIS), combines graphic representation of the territory with data base management and statistics analysis tools, and is evolving constantly with each new version constituting an important qualitative jump in terms of processing power and capabilities.

However, none of these applications considers the possibility of generating material physical models of a given territory, made to scale, to which one could add a series of geographical data or even insert models with building representations made with CAD.

This paper describes the process of building terrain material models of great precision and accuracy by using and transforming data in GIS through Rapid Prototyping techniques. These techniques are currently used to fabricate objects obtained directly from a digital model stored in a data file.

Keywords: GIS, DTM, DEM, Rapid Prototyping, 3D Printing

1. INTRODUCCIÓN

Fabricar una maqueta de un terreno con edificaciones y otras informaciones geográficas no es algo muy corriente, pero, a veces, aporta una serie de ventajas importantes que hacen aconsejable afrontar su realización, sobre todo si se

utiliza una tecnología como el Prototipado Rápido, preciso, rápido y sin un elevado coste económico:

- **Facilidades para la correcta interpretación de mapas:**

En muchas ocasiones, la información sobre la ordenación del territorio que se muestra mediante mapas es utilizada por personas

sin conocimientos de cartografía y sin entrenamiento en la lectura e interpretación de mapas bidimensionales. En mapas bidimensionales, la tercera dimensión se muestra frecuentemente, como una variable visual, como el color o la textura, con las dificultades que ello conlleva. Sin embargo, la interpretación de objetos tridimensionales es algo natural en el ser humano y la estimación de distancias y formas es más precisa gracias al funcionamiento estereoscópico del sentido de la vista, evitándose, al mismo tiempo, los errores interpretativos debidos a las perspectivas. Incluso con especialistas en la materia, la transmisión de la información se realiza de una manera más rápida y eficiente con modelos físicos que pueden ser utilizados en el proceso de toma de decisiones de las empresas.

- **Publicidad de producto:**

La realización de un modelo físico del terreno es utilizada frecuentemente por muchas empresas en técnicas de marketing, con la finalidad de transmitir mejor a los clientes las características del producto que ofertan. Son habituales las empresas de construcción que realizan una maqueta para mostrar la disposición y apariencia de los edificios que realizan. Sin embargo, muchas veces, acontece la coexistencia de una representación muy precisa y detallada de las edificaciones, junto con una representación del terreno circundante inexistente o, cuando menos, tan imprecisa que cualquier parecido con la realidad es mera coincidencia. La explicación de este hecho está en la dificultad de construir una representación del terreno (irregular por naturaleza) con la exactitud deseada. Ahora bien, muchas empresas ya son conscientes del valor añadido que aporta una representación exacta del terreno que posibilite la apreciación de las vistas y paisajes circundantes a las construcciones.

- **Personas con discapacidad visual:**

La realización de modelos físicos materiales es la mejor manera para transmitir información no auditiva a personas ciegas o con seria discapacidad visual. Las representaciones gráficas en pantallas de ordenador son opacas para este tipo de personas. Sin embargo, han suplido la carencia de visión con un gran desarrollo del sentido del tacto que les permite apreciar formas y relieves con gran

facilidad (como ocurre, por ejemplo, en el sistema Braille de Escritura).

- **Experiencia háptica:**

Con experiencia háptica, se hace referencia al conjunto de sensaciones no visuales ni auditivas que experimenta un individuo. Fundamentalmente las sensaciones táctiles aportan una serie de informaciones complementarias (texturas, rugosidad,...), tanto objetivas como subjetivas, que son muy importantes en el proceso de la percepción. Esta experiencia háptica no se obtiene mediante las representaciones tridimensionales informatizadas que producen los SIG ni los programas de aplicaciones gráficas y puede ser proporcionada mediante la realización de un modelo material, solución más al alcance que otras técnicas como la Realidad Virtual a través de sensores y transductores.

- **Facilidad en la localización de detalles:**

Los modelos físicos permiten solventar más fácilmente, con ligeros movimientos del cuerpo y giros de cabeza, la problemática en la visualización de zonas del modelo ocultas de la línea de visión por obstáculos en el terreno. Con modelos informáticos tridimensionales la visualización de estas zonas acostumbra a ser más dificultosa debida a las limitaciones de la interfaz hombre-máquina que, en estos momentos, para aplicaciones GIS, todavía es dependiente de los botones y movimientos del ratón.

- **Didactismo:**

La enseñanza de todas aquellas disciplinas en las que se precisa trabajar con mapas e informaciones georreferenciadas, puede facilitarse enormemente gracias al didactismo inherente a los modelos materiales. Baste como ejemplo la explicación de construcciones geológicas, como fallas o plegamientos, mediante modelos físicos existentes en la realidad.

- **Aplicaciones Militares.**

Ahora bien, la confección tradicional de modelos físicos del terreno también presenta una serie de inconvenientes que es necesario referenciar:

Precisión: La creación de maquetas con los materiales y medios tradicionales es una tarea ardua en la que es muy difícil

alcanzar un nivel de precisión y exactitud dentro de los límites tolerables.

Tiempo de creación: La forma irregular del terreno trae como consecuencia un aumento considerable del tiempo dedicado a la confección del modelo físico del terreno.

Coste económico: Debido a los materiales utilizados y al tiempo y mano de obra consumidos en su construcción, las maquetas confeccionadas por medios tradicionales tienen un elevado coste económico.

Espacio de almacenamiento y dificultad de traslado: Para apreciar detalles en la representación de terrenos extensos, es necesario utilizar escalas que producen modelos que ocupan un volumen más o menos grande, que va a generar problemas para su exposición y almacenamiento. Así mismo, su traslado puede plantear dificultades adicionales.

Modelos Estáticos: Los modelos materiales presentan una desventaja importante, con respecto a los modelos virtuales tridimensionales, en relación a la incapacidad de representar la evolución temporal del terreno y de la información representada, mediante animaciones gráficas o paseos virtuales "a vista de pájaro".

La utilización de modelos realizados mediante Prototipado Rápido está produciendo ventajas notables en la industria y el desarrollo de producto por causa de la gran precisión dimensional y geométrica alcanzada en los prototipos, así como su reducido coste económico y la disminución del tiempo de fabricación. La sensible mejora en estos factores, que constituían su mayor desventaja, posibilita plantearse la fabricación de modelos materiales de terreno mediante estas técnicas.

2. OBJETIVOS

El objetivo del presente trabajo es describir el proceso de construcción de modelos materiales del terreno, de gran precisión y exactitud, a partir de datos utilizados y transformados en Sistemas de Información Geográfica, mediante técnicas de Prototipado Rápido.

El proceso puede ser dividido en 2 etapas principales:

- Generación de la definición del modelo en formato STL a partir de la cartografía digital disponible.
- Fabricación del modelo en una máquina de Prototipado Rápido.

3. MATERIALES

Para ilustrar el proceso que se describe, desde el fichero original de cartografía hasta la obtención del modelo físico, se ha realizado la impresión de dos relieves diferentes:

Terreno 1: Relieve con grandes desniveles, correspondiente a un terreno montañoso, con una superficie de 11 x 8 Km y rango de elevaciones comprendido entre los 438 y los 3668 metros, realizado a la escala 1:75.000.

Terreno 2: Relieve con diferencias de cota mucho más moderadas, con una superficie de 3x3 Km y rango de elevaciones comprendido entre los 577 y los 718 metros, impreso a la escala 1:50.000.

El trabajo material de impresión se ha realizado con una máquina **Zprint 310 plus** de la empresa ZCorporation, y equipo relacionado, perteneciente al **Grupo de Investigación en Biomecánica del Departamento de Engenharia Mecânica de la Universidad de Aveiro en Portugal**, que amablemente permitió su utilización para la confección del presente trabajo.

4. OBTENCIÓN DEL FICHERO DE ESTEREOLITOGRAFÍA (STL) A PARTIR DE LA CARTOGRAFÍA DIGITAL

Las máquinas y tecnologías de Prototipado Rápido utilizadas para la generación de modelos físicos directamente a partir de un computador utilizan el formato de Estereolitografía (STL) para definir la geometría del objeto. Por lo tanto, es necesaria una transformación de la información cartográfica de partida (mapa en papel, curvas de nivel vectorizadas, Modelo Digital de Elevaciones –DEM-, etc.) a ese formato para conseguir la fabricación física del modelo. En las siguientes líneas

se va a hacer una descripción de una de las posibles metodologías para realizar dicha transformación.

4.1. Conversión del Shapefile de Curvas de Nivel en formato STL

El proceso se inicia con la conversión del fichero que contiene la información del relieve del terreno, en un fichero de EstereoLitografía (STL).

En el caso de estudio se disponía de cartografía digital en formato vectorial Shapefile de ArcGis, compuesta por curvas de nivel en intervalos de 50 metros.

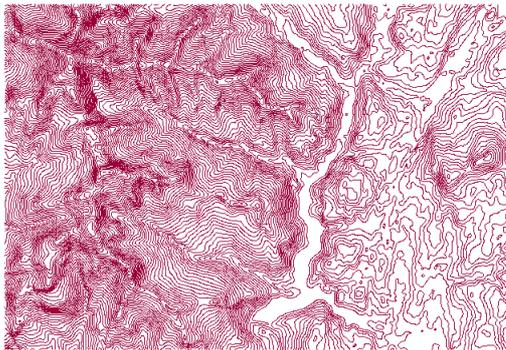


Fig. 1. Shapefile de curvas de nivel (Terreno 1).

La primera parte del proceso de transformación se llevó a cabo dentro de la aplicación ArcGis, mediante la creación de un TIN (red de triángulos irregulares) con la información del relieve, obtenido mediante un proceso de interpolación de datos a partir de las curvas de nivel.

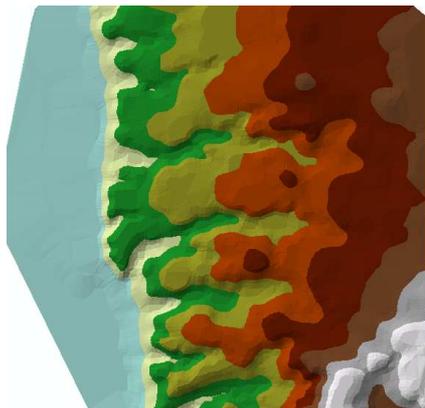


Fig. 2. TIN del Terreno 2 (ArcGis).

El TIN contiene información vectorial que debe ser convertida a un Modelo Digital de Elevaciones Ráster (DEM) que será utilizado por la aplicación que va a general el fichero STL. Para su generación se utilizó el comando "convert TIN to Raster" de la extensión 3D Analyst de ArcGis. La capa ráster generada se almacenó en disco

mediante su exportación a formato Imagine de ERDAS.

Los ficheros que contienen el modelo digital del terreno son ficheros de tipo Raster, o de mapa de bits, compuestos por una serie de celdas, denominadas píxeles, dispuestas en una rejilla bidimensional de filas y columnas. Cada celda equivale a una superficie de terreno, de forma cuadrada. Cuanto menor sea la superficie equivalente del píxel, más precisión tendremos en la representación del terreno. Este formato de fichero es uno de los más extendidos en los SIG para la representación de superficies cartográficas y es muy utilizado como formato de intercambio entre distintas aplicaciones.

Para transformar el DEM en STL se ha utilizado un programa de procesamiento de gráficos que permite la importación y exportación de muchos tipos de formato, tanto ráster como vectoriales. Se trata del **Global Mapper** en su versión 10.02, una aplicación de gestión de mapas con posibilidad de tracking GPS, medición de distancias y cálculo de secciones, entre otras opciones. Una vez iniciado el programa se procede a la importación del fichero Imagine de ERDAS, para, acto seguido, exportarlo como STL mediante la opción de menú **File → Export Raster and Elevation Data → Export STL...** En la ventana de parámetros de exportación podremos modificar la escala (superficie de terreno por píxel), así como indicar los límites de la exportación.

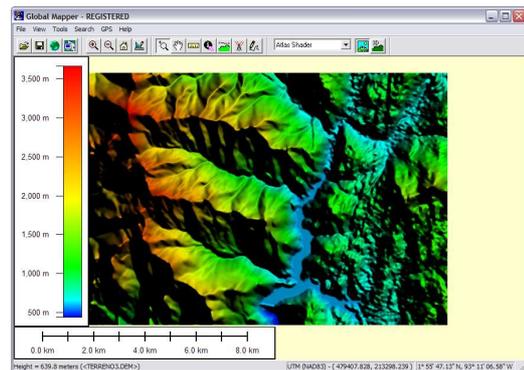


Fig. 3. DEM del Terreno 1 en el Global Mapper.

El fichero STL generado almacena la definición de la superficie del terreno aproximándola mediante una serie de triángulos y la dirección de la normal de cada uno de ellos, de una manera parecida a como lo hace la retícula de triángulos irregulares (TIN) en un SIG.

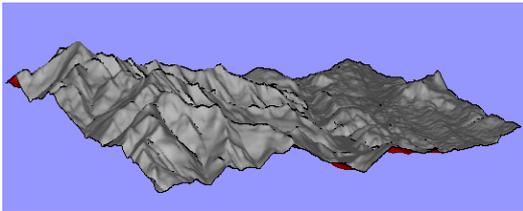


Fig. 4. Definición de la Superficie del Terreno 1 almacenada en el fichero STL.

4.2. Conversión de la superficie del terreno en un sólido 3D

El contenido de un fichero STL exportado con Global Mapper, consta, exclusivamente, de la superficie que define el terreno y, por tanto, no es un sólido tridimensional. Por otra parte, las máquinas de Prototipado Rápido sólo trabajan con sólidos 3D susceptibles de ser seccionados por una serie de planos paralelos, con el objeto de obtener cada una de las capas que serán fabricadas en el proceso.

En consecuencia, la siguiente etapa consistirá en la transformación de la superficie de espesor 0, que define el terreno, en un sólido 3D. Para ello, se ha utilizado una aplicación diseñada para la manipulación, transformación y corrección de ficheros STL, para uso en Prototipado Rápido, denominada **Magics RP**, en su versión 9.54. En cualquier momento del proceso puede aplicarse la escala deseada a la representación, mediante la opción **Rescale**. En el caso de estudio, se ha aplicado al terreno 1, más abrupto, una escala de 1:75.000 y al terreno 2, más plano, una escala de 1:50.000.

A continuación realizamos un **Offset de la superficie** (comando **Offset Part**), con el objeto de aplicarla un pequeño espesor (1 mm) y convertirla en un sólido, ya que los triángulos de la superficie no se pueden extruir directamente, antes de ser convertidos en sólidos.

Después de la generación del offset, es preciso hacer una **extrusión** del sólido obtenido, con el objeto de darle una profundidad al terreno por debajo de la superficie. Seleccionado el sólido, se ejecuta el comando **Extrude**, indicando la magnitud deseada y la dirección en la que se aplicará la extrusión (en nuestro caso, sentido negativo del eje Z).

Como se observa en la imagen, se ha obtenido un sólido que presenta las mismas irregularidades en la parte superior y en la parte inferior, debido a que la

extrusión es constante para cada punto de la superficie.

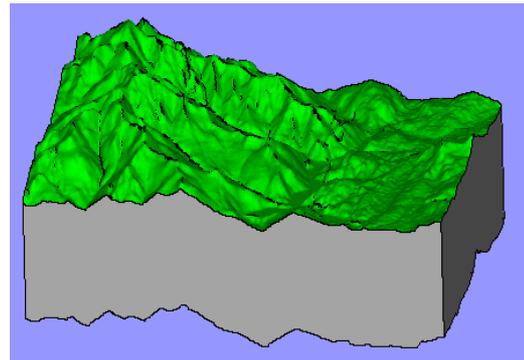


Fig. 5. Extrusión de la superficie del Terreno 1 en Magics RP.

Sería deseable, no obstante, que la base inferior fuese plana para poder apoyar el modelo sobre un plano horizontal. El proceso seguido en Magics RP consistió en crear un prisma rectangular que intersectara con la parte inferior del sólido extrusionado y, posteriormente, ejecutar una operación de sustracción Booleana para eliminar del sólido el prisma creado.

El resultado final después de este proceso puede guardarse en el disco duro como un fichero STL que contiene la información correspondiente a un sólido 3D que representa un modelo de relieve a escala.

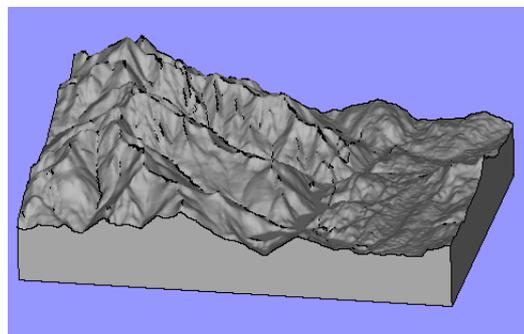


Fig. 6. Modelo Final en formato STL apto para ser impreso en la Impresora 3D.

5. IMPRESIÓN TRIDIMENSIONAL (3DPRINT)

Una vez obtenido el fichero STL con la información correspondiente al terreno que queremos fabricar, debemos abrirlo en la aplicación de Prototipado Rápido (Zprint) que controla la máquina que va a ser utilizada para la confección del mismo, en el caso que nos ocupa una impresora 3D **Zprinter 310 plus**.

La ventaja de utilizar la aplicación propietaria desarrollada por el fabricante de la impresora consiste, fundamentalmente, en que el software conoce las dimensiones máximas que se pueden crear en cada una de las 3 direcciones y, por tanto, hace un chequeo para indicar al usuario si el volumen queda situado completamente en el interior del volumen útil del dispositivo. También permite realizar cálculos para establecer el volumen total de polvo cerámico que va a ser utilizado, así como el volumen del líquido aglomerante consumido para dar cohesión a cada capa y establecer el tiempo total aproximado de confección de la pieza.

Al abrir el fichero STL, la aplicación pregunta el **tipo de polvo cerámico** que va a ser utilizado para la confección de la pieza. Los materiales utilizados por este tipo de impresoras pueden ser materiales basados en yeso o en almidón. En el relieve que se fabricó para ilustrar este trabajo, fue empleado un polvo denominado **ZP130**, de tipo yeso.

También es preciso especificar el tipo de unidades de longitud utilizadas en la representación de la pieza, entre milímetros, centímetros, metros o pulgadas. Para la confección de modelos cuya escala de representación produzca una pieza que excede el tamaño máximo que se puede imprimir en el dispositivo, se procede a la división de la pieza en un número determinado de módulos que deberán ser unidos una vez procesados para formar el modelo final.

La aplicación va a permitir realizar una serie de operaciones básicas con el sólido cargado. Las más importantes son su *reorientación* y *desplazamiento* para ubicarla en la posición más favorable para conseguir la mayor precisión y exactitud dimensional y geométrica. Otra operación aplicable al sólido es el **reescalado**, mediante el cual podemos modificar su escala, multiplicando todas las dimensiones definitorias del objeto por un mismo factor de proporcionalidad (o porcentaje). Una opción especial es el **escalado anisométrico**, mediante el que podemos establecer una proporción diferente en cada uno de las 3 direcciones del espacio. Esto nos permite utilizar, por ejemplo, una reducción mucho mayor en los ejes X e Y que en la dimensión Z correspondiente a la altura, lo que en modelos con poca variación en el relieve, puede ser muy útil al conseguir resaltarlos. En la imagen

siguiente se muestra un relieve sin distorsión, esto es, con el mismo factor de reducción en los 3 ejes.

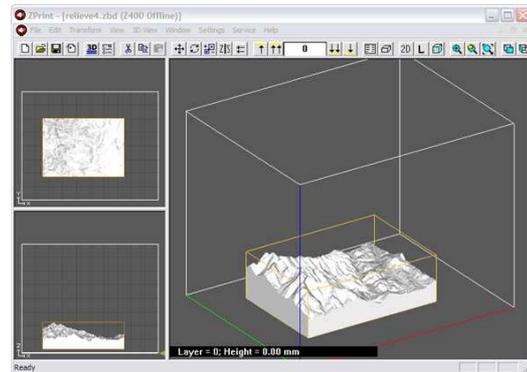


Fig. 7. Ventana de la aplicación Zprint.

El siguiente paso es determinar el espesor de la capa, entre los posibles para el tipo de máquina y clase de material. La impresión 3D descompone el sólido en una serie de capas, generadas por el corte del mismo por planos paralelos. El dispositivo fabrica una capa, cuya superposición y pegado a las anteriores, van conformando el objeto que se quiere obtener. Cuanto más pequeño sea el espesor de capa, mayor precisión se obtendrá en el sólido fabricado. En los relieves impresos para ilustrar este artículo, el espesor de capa utilizado fue de 0,1mm, seleccionado entre 2 posibles valores, 0,1 y 0,0875 mm.

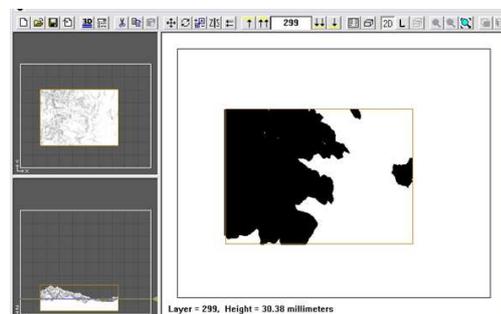


Fig. 8. Visualización de capas.

Para dar cohesión al sólido que se va imprimiendo, se utiliza un líquido aglomerante que, como se puede apreciar en la siguiente fotografía, correspondiente a la base del terreno, no embebe toda la superficie de la capa, sino que se distribuye en los bordes, exteriores e interiores, y en una retícula que consigue mantener unida la pieza, al tiempo que se ahorra aglomerante y se evitan deformaciones geométricas producidas por el exceso de líquido. El tipo de cola que se utilizó en la fabricación de los modelos ejemplo, fue el denominado **Zb50**.



Fig. 9. Distribución Reticular del Aglomerante.

El aglomerante vertido sobre el polvo tiende a diseminarse ligeramente fuera de los límites del modelo, lo cual produce una falta de precisión y la aparición de errores dimensionales y geométricos en el proceso. Para contrarrestar esta expansión fuera de los límites dimensionales del modelo puede aplicarse la denominada “compensación por desbordamiento”, que reduce ligeramente el espesor de la pieza en las 3 direcciones del espacio. Estos valores de compensación dependen del tipo de aglomerante y del tipo de polvo base utilizado, por lo que son valores recomendados por el fabricante. Sin embargo, el desbordamiento también depende de ciertas condiciones ambientales, como la temperatura o la humedad, por lo que es posible modificar los valores de compensación para cada una de las direcciones del espacio.

Una vez ejecutado el comando de inicio de impresión y después de un tiempo de calentamiento para alcanzar la temperatura óptima, comienza el proceso de creación de la primera y, posteriormente, de las sucesivas capas hasta conseguir la formación completa del sólido.

Después de finalizada la impresión, es necesario dejar un tiempo para que la temperatura en el compartimento interno descienda y, al mismo tiempo, permitir el secado completo de la solución aglomerante, para conseguir el máximo grado de cohesión posible. Si la cantidad de aglomerante no es suficiente (debida a obturación en el cabezal de impresión) o no se ha dejado el tiempo suficiente de secado, la siguiente fase del proceso se convierte en una fase crítica que puede conllevar a la fractura del sólido conformado.

Una vez secado el aglomerante, se procede a la **extracción de la pieza** y a su

posterior limpieza para eliminar todo el polvo sobrante. Debe procederse con sumo cuidado e ir eliminando el polvo de la zona circundante de la pieza con una espátula. Una vez visibles las superficies del objeto, se hace una limpieza más profunda, utilizando un pincel.

Cuando la pieza ha quedado totalmente al descubierto, debe ser trasladada al **set de aspiración** donde se hace una limpieza profunda del polvo sobrante haciendo incidir sobre las superficies de la pieza una fina columna de aire comprimido, lo suficientemente grande para dispersar las partículas no adheridas, pero sin alcanzar un nivel de fuerza elevado que podría romper el objeto fabricado. Este proceso es especialmente útil para huecos interiores o perforaciones de pequeño tamaño en las que las partículas pueden compactarse sin necesidad de aglomerante. Esta acción debe realizarse con una pantalla protectora que evite la inhalación de las partículas de polvo en suspensión.



Fig. 10. Terreno 1 antes de la impregnación con la resina.

Finalmente, para terminar el proceso, después de haber eliminado todas las partículas sobrantes es conveniente aplicar al objeto, debido a la fragilidad del mismo inherente a su composición y fabricación, un **tratamiento superficial de impregnación**, a base de una resina o un pegamento con la finalidad de aumentar la rigidez y resistencia del sólido y conseguir su estabilidad térmica. El material impregnante utilizado fue el pegamento de Cianocrilato, ***Z-Bond 101***, que debe ser distribuido uniformemente por la superficie del modelo, evitando la aglomeración excesiva de líquido en zonas convexas, lo que podría introducir errores notables en las dimensiones. Es necesaria la aplicación con guantes protectores, evitar el contacto con superficies que no pertenezcan al

modelo y dejar secar al aire durante al menos 10 minutos.



Fig. 11. Resultado final del Terreno 2.

6. CONCLUSIONES

- En las páginas anteriores se ha puesto de manifiesto el amplio abanico de posibilidades que aporta la tecnología del Prototipado Rápido (RP) a la representación de la Información Geográfica.
- La generación de modelos materiales de terreno constituye una representación óptima de la Información Geográfica en determinadas situaciones que fueron analizadas en el texto.
- El proceso de creación de modelos materiales mediante Prototipado Rápido es una alternativa precisa, rápida y barata a tener en cuenta y que supera con creces la construcción de maquetas de forma tradicional.
- Es de esperar que las dificultades encontradas en la transformación de los datos SIG a ficheros STL sean superadas paulatinamente y que las aplicaciones SIG integren la creación directa de modelos STL y/o mejoren los filtros de importación y exportación de datos entre aplicaciones.
- Sería deseable, también, que los programas SIG incluyeran más posibilidades de creación, modelado y procesamiento de geometría 3D y de entidades gráficas de CAD.

7. REFERENCIAS

- [1] AGRAWAL, S.; ANTUNES, J.P.; THERON, E.; TRUSCOTT, M.; DE BEER, D.J. "Physical modeling of catchmen area by rapid prototyping using GIS data". *Rapid Prototyping Journal*. 2006, Vol.12, issue 2, pp. 78-85.
- [2] DE BEER, D.J.; BARNARD, L.J.; BOOYSEN, G.J. "Three-dimensional plotting as a visualisation aid for architectural use". *Rapid Prototyping Journal*. 2004, Vol.10, issue 2, pp. 146-151.
- [3] HONG LOAN, B.; "Translating AutoCad architectural drawings into rapid prototyping compatible drawing". En: Rapid Prototyping Center. 2003. (Milkaukee).
- [4] JACOBS, L.D.; "Terrain modeling using rapid prototyping". En: *Proceedings of the 2004 National Conference on Undergraduate Research*. (Indianapolis, USA). Disponible en Web: http://www.msos.edu/reu/research_papers/Laura%20Jacobs%20Paper.pdf
- [5] McGEEN, M.; "Recent Architectural Engineering Projects Using Rapid Prototyping". En: *Proceedings of the 2004 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition*. (USA). Disponible en Web: <http://architectural.asee.org/2004_papers/2004-17055_Final.pdf>
- [6] RASE, W-D.; "Physical models of GIS objects by Rapid Prototyping". En: *Actas en Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications*. (Ottawa, Canadá).